慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	サイフォン減圧・水封水流排気による減圧蒸留器
Sub Title	A vacuum distillation device with siphon vacuum and water sealed water flow ventilation system
Author	三井, 隆久(Mitsui, Takahisa)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2012
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of the natural science). No.51 (2012. 3) ,p.1- 8
JaLC DOI	
Abstract	淡水不足を解消する1つの有力な方法は, 海水や汚染水から清浄な淡水を得ることである。エネルギー効率という点で, このための最も有力な方法は逆浸透膜法である。しかし, 身の回りには太陽熱や100℃以下の低温熱源が豊富にあり, これらを主要なエネルギー源として活用できるならば, 効率の低い方法でも実用になる可能性がある。本論文では, 電力などのエネルギーおよび装置製作・設置費用のほとんどかからない減圧蒸留装置について述べる。減圧を行うために水の自重を, 水の供給にはサイフォンを, 余分な気体の排気には水封を用いる。安価で製作が容易な蒸留装置は, 逆浸透膜法による大規模な装置が使えない貧困地帯などで実用になる可能性がある。
Notes	原著論文
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20120331-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

Hiyoshi Review of Natural Science
Keio University No. 51, 1－8 (2012)

サイフォン減圧・水封水流排気による減圧蒸留器

三　井　隆　久*

A Vacuum Distillation Device with Siphon Vacuum and Water Sealed Water Flow Ventilation System

Takahisa MITSUI

要旨

淡水不足を解消する１つの有力な方法は，海水や汚染水から清浄な淡水を得ることである。エネルギー効率という点で，このための最も有力な方法は逆浸透膜法である。しかし，身の回りには太陽熱や100℃以下の低温熱源が豊富にあり，これらを主要なエネルギー源として活用できるならば，効率の低い方法でも実用になる可能性がある。本論文では，電力などのエネルギーおよび装置製作・設置費用のほとんどかからない減圧蒸留装置について述べる。減圧を行うために水の自重を，水の供給にはサイフォンを，余分な気体の排気には水封を用いる。安価で製作が容易な蒸留装置は，逆浸透膜法による大規模な装置が使えない貧困地帯などで実用になる可能性がある。

１．はじめに

淡水不足を解消する最も直接的な方法は，海水を淡水に変えることである。海水の塩分濃度は４％程度であり，これを塩と淡水に分けるために必要なエネルギーは，理論的にはそれほど大きくなく，得られる淡水の温度を0.6℃上げるために必要なエネルギー程度である(2400J/kg)。この理論限界に近い効率で原理的には淡水化可能な方法として，浸透膜を用いて淡水を浸透圧に逆らって押し出す方法（逆浸透膜法）と，蒸留器において水蒸気を圧縮して温度を上げ海水を蒸発させる方法（蒸気再圧縮法）が知られている。蒸気再圧縮法は，水蒸気を

* 慶應義塾大学日吉物理学教室（〒223-8521　横浜市港北区日吉 4-1-1）：Dep. of Physics, Keio University, 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, 223-8521, Japan. [Received Oct. 7, 2011]

圧縮すること，蒸気から海水へ熱を伝え，海水を蒸発させることが必要であり，各過程における熱損失（温度差）が比較的大きい（0.6℃よりはるかに大きい）ため，高効率化は難しい。逆浸透膜法は，優れた膜が開発されつつあるので，現在最も効率的な方法といえる［1］。

しかし，地上には太陽光が満ちあふれており，これを用いた方法であれば，エネルギー効率がかなり低くても実用になるのではないか，コストで逆浸透膜法より安い淡水を供給できるのではないかと考え，本研究を始めた。このためには，装置の製作・運用コストを徹底的に下げる必要があり，従来使われているような機械式の真空ポンプを用いない減圧蒸留器が必要である。また，世界には高価な装置を購入できない人々も多く，このような人たちに自作可能な簡単な構造の減圧蒸留器を提案できれば，役に立つのではないか。本論文では，このような観点に立って行われた研究について述べる［2］。

2．サイフォン減圧，水封水流排気による減圧器

本減圧蒸留器では，サイフォン，すなわち水の自重を用いた減圧を行う。図1に減圧の原理を示す。上部を閉じた容器に水を入れ，下端を開放して大気圧にすると，水には自重があるため，容器内の圧力は，大気圧より下がる。原理的には高低差 h_D を10m 以上にすると真空になるが，実際には水が沸騰・蒸発するため水の蒸気圧が限界である。しかしながら，減圧蒸留器として必要十分な真空度である。

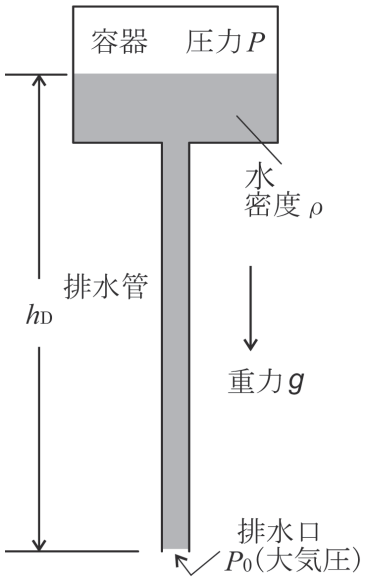

図1　水の自重を用いた減圧の原理。排水口の圧力が大気圧でも，容器内の圧力は，水の蒸気圧まで減圧できる。

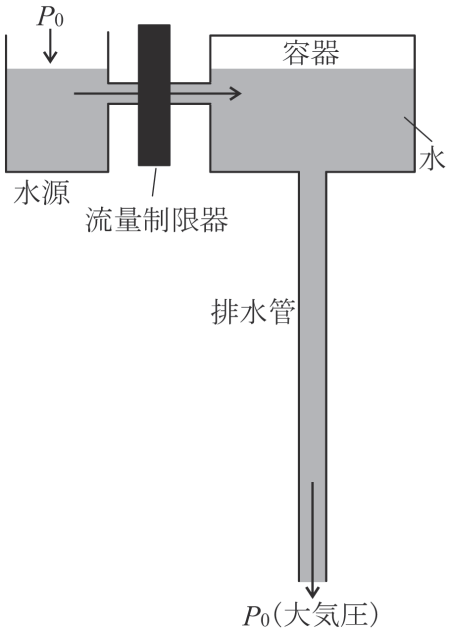

図２　減圧容器に連続的に水を注入する方法。容器内は減圧されているので，大気圧の水を容易に流入させることができる。流入しすぎると容器内の圧力が上がるので，流量制限が必要である。

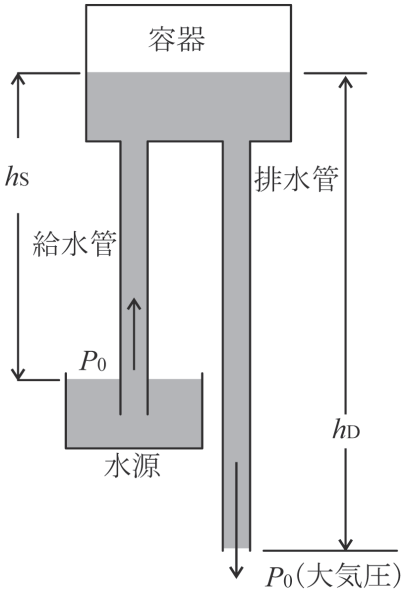

図３　減圧容器に連続的に水を注入する方法。サイフォンを用いて水源の水を吸い上げると，図２に示した方法よりエネルギー消費量を減少させることができる。

蒸留器として効率よく運転するためには，連続動作が必要である。容器内は減圧されているので，図２に示すように，流量制限器を用いて少しづつ水を供給することにより連続動作が可能となる。流量制限器が無いと一気に水が流れ込み，容器内が短時間で大気圧になる。

さらにエネルギー効率を上げた供給方法として，図３に示すようなサイフォンを用いた方法が考えられる。水源を排水管の先端より高くしておけば，原理的には容器内を減圧したままサイフォン原理により連続的に水が流れる。しかしながら，実際にこのような装置を作り，水を流すと，連続的にいつまでも水が流れる場合と，途中で止まる場合がある。水流が中断してしまうのは，水の中には空気など気体が溶けており，減圧されると気体が水から出て，容器内に溜まり，容器の圧力が上がることによる。サイフォン減圧器が連続的に動くためには，容器内に溜まった気体を大気へ排気する機構が必要である。

図４は排気機構を示す。(a) は，容器内に気体が溜まった状態である。このままでは，これ以上減圧することはできないが，排水管から水が下方に流れ減圧することで給水管から水が供給され，図４(b) に示すように，排水管に気体の一部が閉じこめられ，水流と伴に下流へ流れ，やがて大気へ排気される。

図５に，排水管に気体を封じ込めて排気する機構を示した。アクリルや塩化ビニールなど疎水性の排水管の場合，内径が８mm よりも細い場合，水は表面張力により丸くなろうとして，

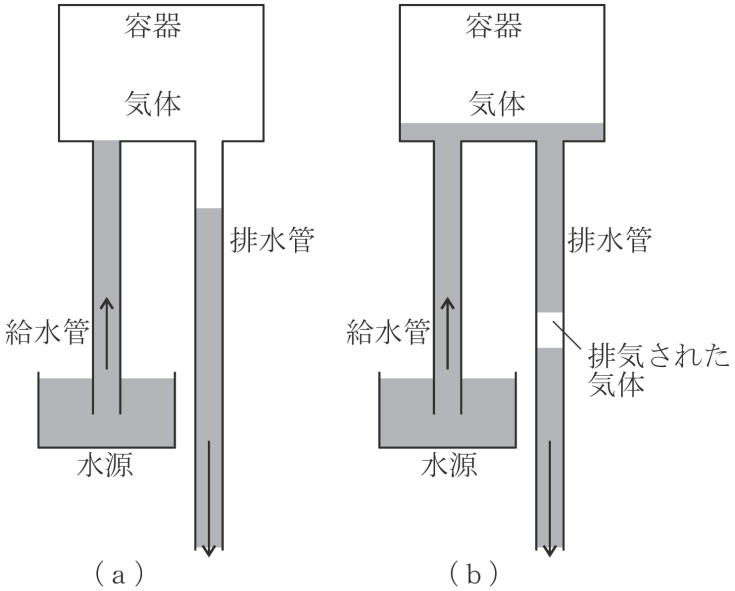

図4　減圧容器内に溜まった気体の排気方法。(a) 容器内に気体が溜まり，排水管に気体が吸い込まれる。(b) 同時に，給水管から水が供給され，容器に溜まるだけでなく，排水管にも吸い込まれ，気体を閉じこめて，大気へ排気する。

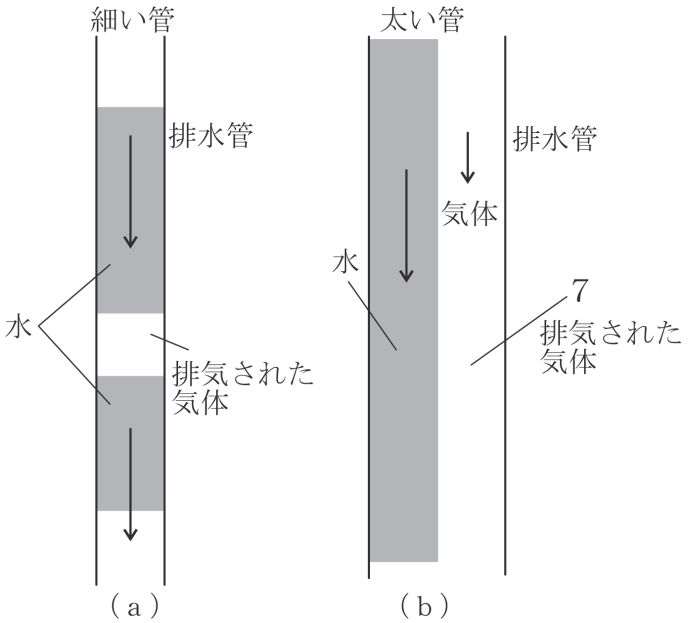

図5　排水管内での気体の流れ。(a) 排水管が細い（直径8 mm以下）場合，表面張力で水が球体になろうとするため，排水管がふさがれ，気体を閉じこめて排気することができる。(b) 排水管が太い場合，水が勢いよく流れていれば，気体を引きずって排気できる。

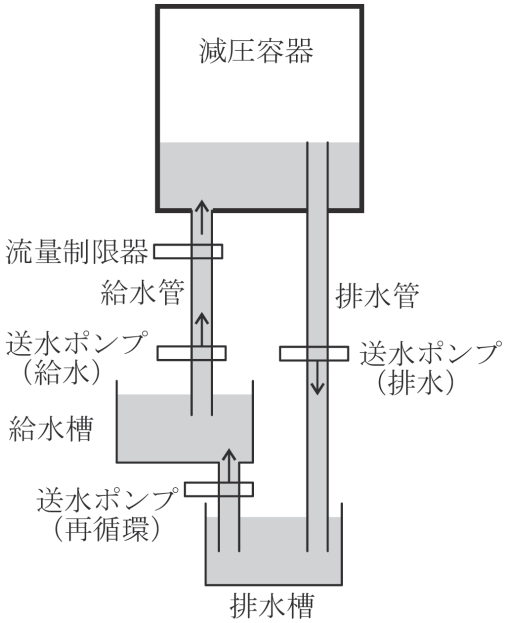

図６　機械式ポンプを用いる場合。本装置はポンプを必要としないが，機械式ポンプを用いると，設置に対する制限を受けにくくなる。特に，排水側にポンプを入れると排気効率が向上する。

図５(a) のように排水管内で気体を封じ込めて流れる。８mm より排水管の内径が太い場合には図５(b) のように，管内の一部を流れるので，気体が逆流し，排気できないことがある。しかしこのような場合でも，水の流速が速いと水の流れに気体が引きずられて，ある程度排気できる。

本減圧機は原理的には，機械式のポンプを全く使用しなくても水位差を用いて連続的に減圧を行うことが可能である。しかし，補助的に機械式ポンプを用いると，設置のための制約条件が緩やかになる。特に，排水管の途中に送水ポンプを入れると，気体の排気能力が向上するので，高真空を維持しやすくなる。ベーンポンプを排水管に入れることで，排気能力が向上することを実際に確認した。

以上，単純な構造でほとんどエネルギーのいらない減圧器の原理について述べた。図５に示す装置には，機械的に動く部分やダイヤフラム（薄膜），微細な孔などデリケートな部分が無くゴミなどに対して破損の心配がなく，機械的に丈夫である。また，金属部分がなく，腐食性の海水などでも長時間使用可能である。

３．減圧蒸留器

本減圧器を減圧蒸留器に応用した例を図７に示す。減圧容器は凝縮部と蒸発部に仕切られている。凝縮部は，冷淡水の流れる部屋で，減圧を行うと伴に，蒸気の凝縮をする。蒸発部は，

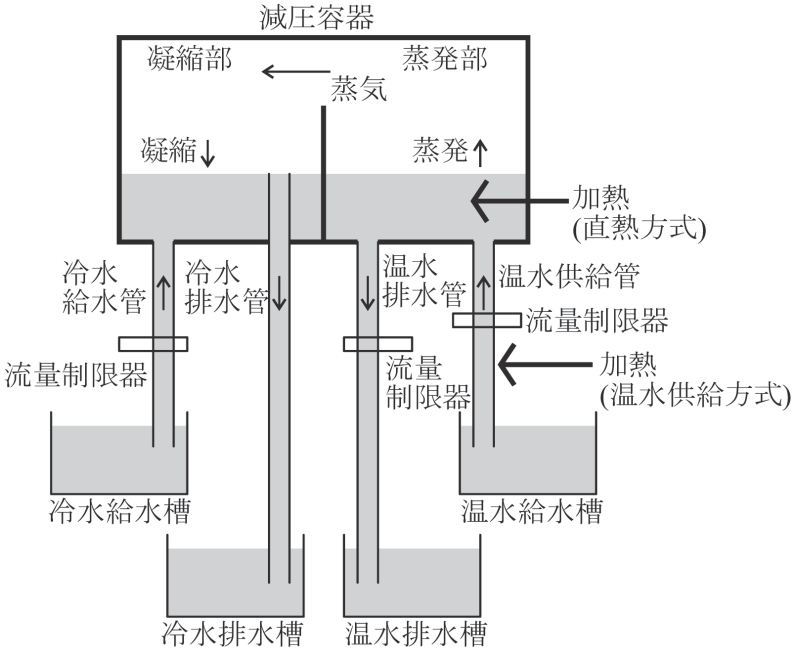

図７　本減圧装置を用いた蒸留器の例。減圧容器蒸発部内の水を加熱する方法と，加熱された水を蒸発部に送る方法がある。

暖めた海水を入れる部屋で蒸発を行う。冷淡水も温海水もサイフォン原理を用いて流入流出を行う。温海水の水位を適切に保つために，温水排水管にも流量制限器が必要である。減圧容器内は，冷淡水の蒸気圧程度まで減圧を行うことができ，温海水からの蒸気は冷淡水で凝縮して混ざり，冷水排水管から取り出される。

海水は，減圧容器内の蒸発部で加熱する方法（内部加熱）と，減圧容器外部で加熱して蒸発部へ供給する方法（外部加熱）がある。内部加熱の優れている点は，容器内真空度で決まる沸点まで海水を加熱すればよいことである。これは冷却水より僅かに高い程度であり，低温熱源の有効利用ができる。欠点は，太陽光のようにエネルギー密度の低い熱源を用いる場合，蒸発部の形状が大きくなることである。蒸発部は，減圧により生じる大気圧に押しつぶされないように丈夫に作る必要があり，あまりに大きくするとコスト面で不利になる。

外部加熱では，供給した温海水が蒸発しながら気化熱により温度を下げ，冷却水の温度まで低下したところで蒸発が止まり，排水される。利点は，蒸発部を小さく作れることであり，欠点は，温海水の供給温度を冷却水の温度よりかなり上げる必要があること。構造上は，外部加熱の方が簡単である。

４．試作機

試作機１号を図８に示す。これは，本方法で実際に減圧が可能か否かを検証するための装置

である。本装置は減圧蒸留器用であり，100℃以下で使用するので，透明アクリルで製作した。減圧に伴い，大気圧が加わるので爆縮しないよう，丈夫に作られている。水道水を装置に供給し，排水しながら排気を行うことで減圧が可能であることの確認ができた。減圧に伴い，水道水に溶けていた気体が出てくるため，常圧では見られない気泡が多く出てきた。排水管の高低差 6 m61cm なので，0.34気圧まで減圧が期待できるが，水に含まれる気体のため0.54気圧までの減圧になった。本装置は図 2 に示した方法で給水しており，バルブを回転して給水量を調節することで流量制限を行った。減圧を効率よく行うためには適切な流量制限を行う必要がある。

内部加熱方式による試作機を図 9 に示す。内径 6 mm のビニールホースを排水管に用い高低差は 6 m61cm である。80℃で沸騰するため，アクリルでも十分な強度が保てる。蒸発槽内の水は一度脱気されると水蒸気以外の気体をほとんど発生しないので，凝縮槽での排気はほとんど機能する必要がなくなる。本方式は排気量が小さいので，この点は都合がよい。

外部加熱方式による試作機を図10に示す。外部から加熱した温水を蒸留器の中に入れ，蒸留器の中で沸騰させる予定であったが，加熱装置内も減圧されていたため，加熱装置でも沸騰した。外部加熱は温水を流しながら蒸発させるため，蒸発量に対する温水の量が多く，同時に温水から出る気体の量も多い。このため真空を維持するための排気量が大きい必要がある。

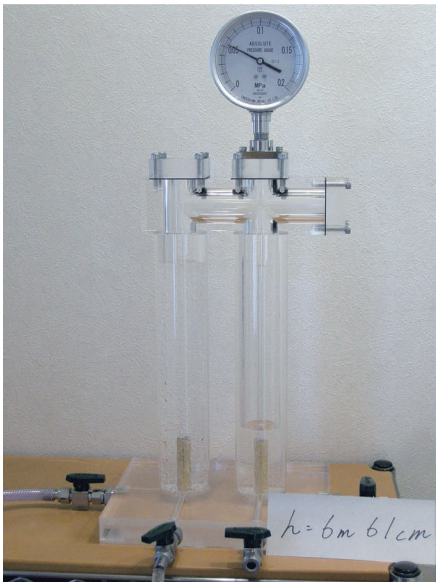

図 8　本論文で述べた原理により減圧を行った実験装置。減圧に伴い水道水に含まれる気体が出て，泡となる。排水管の高低差が 6 m61cm なので，0.34気圧まで減圧が可能であるが，水道水に溶け込んでいた気体の量が多かったので，0.54気圧までの減圧であった。脱気した水を用いるか，排気管の高低差を大きくすればさらに減圧が可能である。

図 9　内部加熱方式の蒸留器。加熱は，試作品なので電気ヒータを用いている。左が凝縮部，右が蒸発部。ヒーターにより加熱すると，圧力に応じた沸点で沸騰を開始する。

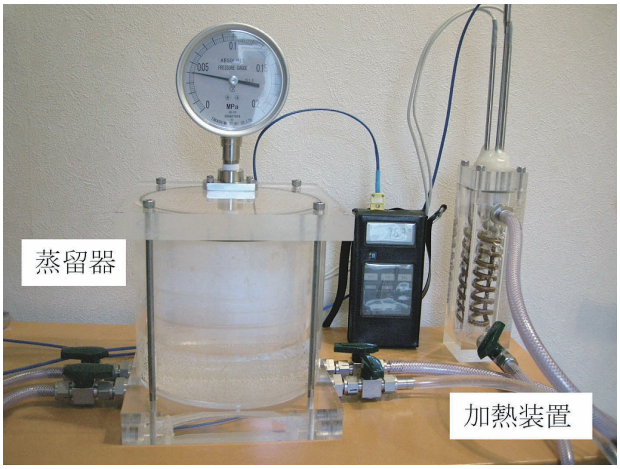

図10　外部加熱方式による蒸留器。高低差は６m40cmである。容器が大きいため，減圧には30分程度時間がかかった。

５．今後の課題

海水から淡水１kgを得るために必要なエネルギーは理論的には約2400Jである。これは，海水の淡水対する浸透圧が2.4MPaであることから導かれる。水の気化熱は2.3MJ/kgであるから，蒸留法はエネルギーという観点では約958倍の無駄をしていることになる。逆浸透膜を用いた方法は，実際には8000J/kg程度で稼働しているので，蒸留法は288倍エネルギー効率が悪い。さて，太陽光を用いて海水淡水化を行うという観点に立つと，逆浸透膜法では太陽電池で発電することになる。太陽電池の光電変換効率を10%と見積もると，太陽電池が太陽光を90%無駄にしているから，効率の比は29倍となる。29倍はたしかに大きいので，減圧蒸留器には勝算が無いように思えるかもしれないが，例えば１m^2の太陽電池パネルの価格・維持費と，29m^2の温水パネル（砂漠にふたのある水たまりを作る，もしくは単純な金属管）の価格・維持費を考えるとどちらが有利かわからない。

減圧蒸留器で効率を上げる方法の一つは，多段化することである。例えば，100℃で蒸発した蒸気を用いて減圧環境下の90℃の海水を蒸発させ，ここで発生させた蒸気を更に減圧環境下にある80℃の海水の蒸発のために用いる方法が考えられる。このように多段化すると，効率は向上するが，構造が複雑になる。本減圧法に適した構造の簡単な多段化蒸留器は，今後の課題である。

参考文献

［１］小宮山宏著『入門熱力学』培風館，1996年。
［２］国際出願 PCT/JP2009/063534